تعیین زاویهٔ مناسب صفحات مغروق به‌منظور کنترل فرسایش ساحل پیچان‌رود★

عزیز سوزه‌پور(۱) محمود شفاعی بجستان(۲)

چکیده *رودخانه‌ها در محل قوس‌ها به‌دلیل تشکیل الگوهای سه‌بعدی جریان همواره در معرض فرسایش در پنجهٔ ساحل خارجی و رسوب‌گذاری در ساحل داخلی می‌باشند. روش‌هایی که تاکنون به‌منظور اصلاح الگوی جریان ارائه شده‌اند برروی بستر احداث می‌شوند؛ بنابراین خود سازه‌ها در این روش درمعرض آبشستگی قرار دارند. از این‌رو، در مطالعهٔ حاضر کارایی صفحات مغروقی که بالای بستر نصب می‌شوند به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه شده‌است. برای رسیدن به اهداف این تحقیق ابتدا مدل فیزیکی از قوس ۱۸۰ درجه‌ای رودخانهٔ کارون در شرایط بستر متحرک احداث گردید. آزمایش‌های متعددی در شرایط عدد فرود ۰٫۲ (معادل عدد فرود در دبی دو سالهٔ کارون) و در شش زاویهٔ مختلف نصب صفحات برابر ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه نسبت به ساحل یا خط جریان انجام گرفت. نتایج نشان داد که نصب صفحات به‌طور مؤثری چالهٔ آبشستگی را از محل پنجهٔ ساحل به میانهٔ قوس منتقل می‌کند. ضمن این‌که هیچ‌گونه آبشستگی در بستر مشاهده نمی‌شود. از مقایسهٔ تغییرات بستر با زوایای مختلف مشخص گردید که در زاویهٔ نصب ۴۰ درجه چالهٔ آبشستگی کوچک‌تر و دورتر از ساحل نسبت به سایر زوایا اتفاق افتاده‌است.*

واژه‌های کلیدی صفحات غوطه‌ور، زاویهٔ نصب، مدل فیزیکی، فرسایش ساحل.

Best Installation Angle for Immersion Vanes as a Measure for Meander Bank Erosion

A. Sozepoor M. Shafai Bejestan

Abstract *Developing three dimensional vortices at river meander causes severe erosion at the toe of the outer bank and deposition at the inner bank. The flow altering measures which have been presented so far are installed on the bed and are subject to failure due to progress of scour hole at their toe. Therefore in the present study the performance of immersion vanes, which are installed above the bed, are experimentally investigated. To reach such goal a movable physical model of 180 degree Karoon river bend was constructed. Different tests at Froude number equal to 0.20 (=corresponded to the Karoon 2-years flood occurrence discharge) at six different vanes angles equal to 10, 20, 30, 40, 50, and 60 degrees was carried out. The general results show that the immersion vanes are effectively shifted the scour hole from the bank toe to the middle of the bend while no scour is observed at the base of the vanes. By comparing the bed topographic variations after tests it was found that at 40 degrees vane angle the toe scour hole is smaller and developed much farther from the outer bank compare to the other vane angles.*

Key Words Immersion Vanes, Installation Angle, Physical Model, Bank Erosion.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۱۲/۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۱۰/۲۵ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز. Email: asozapor@yahoo.com

(۲) استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

مقدمه

بررسی مکانیک جریان در قوس رودخانه، تغییرات زمانی خم رودخانه، شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و تغییرات بستر رودخانه‌های پیچانرود ازجمله مباحث مهم در زمینهٔ رودخانه‌های پیچانرودی است. رودخانه‌ها در اثر پدیدهٔ فرسایش و رسوب‌گذاری دستخوش تغییرات مستمر می‌باشند. شناخت چنین تغییراتی برای اهداف ساماندهی و ایمن‌سازی رودخانه درمقابل نتیجه‌های به‌دست‌آمده دارای اهمیت فراوانی است. در حالت طبیعی، فرسایش بستر منجر به ناپایداری کناره‌ها می‌گردد و این امر ریزش توده‌ای خاک و تغییر شکل مقطع هندسی رودخانه را به‌دنبال دارد. قوس رودخانه‌ها نیز در اثر فرسایش موضعی جابه‌جا می‌شود و تأسیسات ساحلی را تهدید می‌کند. تأثیر رسوب‌گذاری بر رفتار رودخانه‌ها و نقش آن در فرایند ساماندهی نیز قابل توجه است. در مراحل اولیه اثر رسوب‌گذاری به‌صورت تثبیت بستر و پایداری کناره‌ها و سواحل رودخانه ظاهر می‌شود؛ اما با ادامهٔ روند رسوب‌گذاری تراز بستر افزایش می‌یابد و درنتیجه تغییراتی در ریخت‌شناسی رودخانه‌ها پدیدار می‌گردد که به نوبهٔ خود بر عملکرد کارهای ساماندهی تأثیر می‌گذارد. اقدامات اساسی که با هدف ساماندهی و برقراری شرایط مطلوب انجام می‌گیرد، دخالت در نظام رفتاری رودخانه تلقی می‌گردد و پیامدهای مختلفی را در بر دارد. تغییر رژیم رسوب‌دهی ازجمله پیامدهای بارز ساماندهی است که به نوبهٔ خود روند فرسایش و رسوب‌گذاری و الگوهای مختلف ساماندهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارتی شناخت اثرهای متقابل ساماندهی و فعل و انفعالات فرسایش و رسوب‌گذاری ازجمله چالش‌های مهم در عرصه مهندسی رودخانه است و مستلزم آگاهی از کم و کیف آن می‌باشد. به‌علت وجود جریان حلزونی در مئاندرها، فرسایش ساحلی در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی به‌مراتب بیشتر از مسیرهای مستقیم می‌باشد. فرسایش ساحل خارجی در مئاندرها باعث جابه‌جایی قوس‌ها در رودخانه‌ها می‌شود و درنتیجه باعث تخریب زمین‌های کشاورزی، ابنیهٔ فنی و زیرساخت‌ها و کاهش ظرفیت عبوردهی سیلاب رودخانه می‌گردد. به‌منظور کنترل فرسایش و مدیریت رسوب در مئاندرها دو روش حفاظت مستقیم (لحاف بتنی، پوشش گیاهی، ریپ‌رپ و...) و حفاظت غیرمستقیم (روش‌های اصلاح الگوی جریان) استفاده می‌شود [1]. انتخاب روش مناسب کنترل فرسایش و رسوب‌گذاری در مئاندرها بستگی به شرایط زیست محیطی (اجرای روش‌هایی مانند لحاف بتنی، مانع رشد پوشش گیاهی می‌شوند)، شرایط هیدرولیکی رودخانه و مسائل اقتصادی دارد. به‌عنوان مثال در مئاندرهای که عرض فعلی رودخانه کمتر از عرض تعادلی رودخانه است، روش‌های حفاظت مستقیم پیشنهاد می‌گردد که این شرایط باتوجه به این‌که در مئاندرها نرخ فرسایش قوس خارجی به‌مراتب بیشتر از رسوب‌گذاری قوس خارجی در حالت طبیعی می‌باشد به‌ندرت اتفاق می‌افتد. اخیرا برای مدیریت رسوب در مئاندرها روش‌های حفاظت غیرمستقیم (روش‌های سازهٔ) مورد استفاده قرار می‌گیرند. آبشکن‌ها یکی از سازه‌های اصلاح الگوی جریان هستند که از دیرباز مورد استفاده بوده‌اند. این سازه‌ها در دو حالت نفوذپذیر و نفوذناپذیر در عرض رودخانه و با زاویهٔ مناسب در ساحل خارجی نصب می‌شوند که با دور کردن خط حداکثر سرعت از ساحل خارجی باعث کنترل فرسایش قوس خارجی می‌گردند ابعاد ازجمله ارتفاع، طول مؤثر، زاویهٔ نصب و... براساس دبی دوساله تعیین می‌گردد [2 و 3]. یکی دیگر از سازه‌هایی که به‌طور مؤثری توانسته است با اصلاح الگوی جریان از تغییرات عرضی قوس‌های رودخانه جلوگیری کند، سرریزهای مستغرق می‌باشند. این سرریزها که معمولا از لاشه‌سنگ و در ساحل خارجی قوس احداث می‌شوند باعث می‌شوند تا جریان عبوری از قسمت بالایی سرریز، به‌صورت عمود بر این سازه به‌طرف قوس داخلی تغییرجهت دهد. این سازه باعث کاهش سرعت در نزدیک ساحل، کاهش شدت جریان در قوس خارجی، بهبود زیستگاه آبزیان، بهبود شرایط کشتی‌رانی، رسوب‌گذاری در قوس خارجی (حفاظت قوس خارجی) و کاهش رسوب‌گذاری در قوس داخلی می‌گردد [4، 5، 6 و 7]. روش صفحات مستغرق ازجمله یکی از روش‌هایی است که به‌طور مؤثری می‌تواند با

مدیریت مناسب رسوب در قوس شرایطی را فراهم نماید که تغییرات عرضی رودخانه در محل قوس به حداقل برسد و علاوه‌برآن، با رسوب‌گذاری در محل ساحل خارجی، این ساحل بازسازی گردد. در این روش سازه‌هایی به‌شکل صفحات معمولا مستطیل با ابعاد، زاویه و فواصل مناسب در بستر رودخانه طوری نصب می‌شوند تا در شرایط دبی طرح کاملا مستغرق باشند. در اثر عبور جریان از روی این صفحات، گردابه‌های دنباله‌داری شکل می‌گیرد که باعث تغییرات عرضی تنش برشی بستر می‌گردد و درنتیجه تشکیل حفره در بستر از محل پنجهٔ ساحل خارجی به میانهٔ رودخانه منتقل می‌گردد. علاوه‌براین، صفحات باعث هدایت رسوب به‌سمت ساحل خارجی و درنتیجه رسوب‌گذاری در این منطقه می‌شوند [8]. سازه‌های دیگری همچون سرریزهای w شکل (W-weir) [9، 10، 11]، سرریزهای u شکل (U-weir) [12]، سرریزهای جی هوک (J-Hook) [13]، نیز ازجمله روش‌هایی هستند که به‌خصوص برای مدیریت رسوب در قوس رودخانه‌های کوهستانی توصیه شده‌اند. اخیرا نشان داده شده‌است که مدیریت رسوب در قوس‌های رودخانه‌های مئاندری توسط سازهٔ صفحات مستغرق نیز به‌طور مؤثری امکان‌پذیر است. صفحات مثلثی که می‌توانند از لاشه‌سنگ ساخته شوند می‌توانند الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس را طوری تغییر دهند که از تغییرات عرضی قوس جلوگیری شود؛ ضمن این‌که پشت این صفحات شرایط جریان مناسب برای آبزیان نیز می‌باشد [14 و 15].

بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان به بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی شکل در اعداد فرود ۰/۱۹۴، ۰/۲۱٤، ۰/۲۳۳ و ۰/۲۵۳ در یک قوس ۹۰درجهٔ ملایم با عرض ثابت پرداختند. ایشان نشان دادند که با کاهش طول مؤثر از حداکثر عمق آبشستگی کاسته شده-است. همچنین نشان دادند که با کاهش طول مؤثر سازه، حداقل فاصلهٔ پشتهٔ رسوب‌گذار از ساحل بیرونی کاسته می‌شود [16].

بهرامی یاراحمدی و شفاعی بجستان در تحقیقی به بررسی تأثیر سری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰درجه بر الگوی توپوگرافی بستر پرداختند. ایشان آزمایش‌ها را در چهار عدد فرود و در چهار فاصلهٔ طولی ٤، ٥، ٦ و ٨ برابر طول مؤثر صفحات و در زاویهٔ ۳۰درجه نسبت به ساحل بالادست انجام دادند و نشان دادند که با افزایش فاصلهٔ طولی، حداکثر عمق آبشستگی و گسترش آن تا ساحل بیرونی افزایش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که فاصلهٔ طولی ۸ برابر طول مؤثر فاصلهٔ مناسبی برای صفحات مثلثی نیست [17].

اولین اقدام برای این‌که مطمئن شویم که سازه‌های اصلاح الگوی جریان می‌توانند مشکل را حل نمایند، طراحی ابعاد و نحوهٔ قرارگیری آنها است به‌گونه‌ای که بتوانند تغییرات لازم در الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری را طوری ایجاد نمایند که سیستم رودخانه به یک بازهٔ پایدار برسد. سازهٔ صفحات شناور یکی از سازه‌های اصلاح الگوی جریان در قوس‌ها می‌باشد که تاکنون کار نشده است. این سازه ازنظر عملکرد هیدرولیکی شباهت زیادی با صفحات مستغرق دارد با این تفاوت که بالاتر از تراز بستر رودخانه نصب می‌شود. زاویهٔ نصب صفحات مستغرق از معیارهای مهم طراحی می‌باشد که مستقما بر عملکرد آنها در تغییر الگوی بستر و آبشستگی موضعی اطرافشان تأثیر دارد. زاویهٔ نصب صفحات مستغرق توسط اودگارد ۱۰ تا ۲۰ درجه توصیه شده است [18]. صفحات شناور با توجه به اینکه در ساحل خارجی باعث ایجاد مقاومت در مقابل جریان و نهایتا کاهش سرعت جریان می‌گردند بنابراین از نظر محیط زیستی منطقه‌ی با جریان آرام در عرض رودخانه برای حرکت آبزیان رودخانه‌ی به سمت بالادست ایجاد می‌نمایند. سایر سازه‌های اصلاح الگوی جریان از جمله سرریزهای مستغرق و... که به ساحل خارجی متصل بوده و در بستر قرار دارند با ایجاد تنگ‌شدگی در عرض مجرا باعث افزایش سرعت در دماغه خود سازه می‌شوند، تردد آبزیان در این منطقه را با مشکل مواجه می‌کنند. بنابراین در ساحل خارجی اجرای این سازه‌ها باعث قطع ارتباط

آبزیان پایین‌دست با بالادست خواهد شد که سازهٔ صفحات شناور چنین مشکلات محیط زیستی را ایجاد نخواهد کرد. باتوجه به این‌که سازهٔ صفحات شناور بالاتر از تراز بستر رودخانه نصب می‌شود اجرای آن در رودخانه‌های عمیق با جریان دائمی نسبت به صفحات مستغرق راحت‌تر و کم‌هزینه‌تر است و مهم‌تر از همه در زوایای با عملکرد هیدرولیکی بالا، سازه در معرض آبشستگی موضعی نخواهد بود و احتمال می‌رود ازنظر تغییر در الگوی بستر در مئاندر رودخانه‌ها نسبت به صفحات مستغرق، راندمان بالاتری را داشته باشد. ازاین‌رو، زاویهٔ نصب مناسب صفحات شناور در مئاندرها که تاکنون کار نشده‌است در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌است.

ساحل خارجی باعث ایجاد مقاومت درمقابل جریان و نهایتا کاهش سرعت جریان می‌گردد؛ بنابراین ازنظر محیط زیستی منطقه‌ای با جریان آرام در عرض رودخانه برای حرکت آبزیان رودخانه به‌سمت بالادست ایجاد می‌نماید. سایر سازه‌های اصلاح الگوی جریان ازجمله سرریزهای مستغرق و... که به ساحل خارجی متصل هستند و در بستر قرار دارند با ایجاد تنگ‌شدگی در عرض مجرا باعث افزایش سرعت در طول بازهٔ مدل‌شده تقریبا برابر با ۲ کیلومتر (معادل ۷ متر در مدل فیزیکی) می‌شوند. برای بررسی فرسایش و رسوب‌گذاری از مواد اولیهٔ پلی‌اتلین با قطر متوسط ۲ میلی‌متر و چگالی ۱٫۱ به‌عنوان رسوبات بستر استفاده شد. شکل (۲) پلان قوس جنگیه و نمایی از مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، مدل فیزیکی قوس ۱۸۰ درجه‌ای جنگیه واقع در پایین‌دست شهر اهواز در آزمایشگاه مدل‌های رودخانه‌ای دانشگاه شهید چمران اهواز احداث گردید. قوس مذکور در سال‌های متمادی تغییرات عرضی زیادی را تجربه کرده‌است و باعث تخریب ابنیه روستای جنگیه و یا نخلستان‌های مجاور ساحل خارجی گردیده‌است. شکل (۱) وضعیت کنونی ساحل را نشان می‌دهد. ساحل رودخانه متشکل از لایه‌های فوقانی رسوبی رس متراکم‌شده و مقاوم به فرسایش است و نیز لایه‌های زیرین ماسه‌ای فرسایشی است که در اثر توسعهٔ چالهٔ فرسایشی بستر در پنجهٔ ساحل موجب ریزش ساحل و جابه‌جایی آن می‌گردد.



شکل ۱ وضعیت کنونی ساحل در بازهٔ مدل‌شده



(الف)



(ب)

شکل ۲ الف) پلان قوس مدل شده و ب) نمایی از مدل ساخته‌شده در آزمایشگاه

دو سری آزمایش علاوه‌بر آزمایش‌های مقدماتی انجام شد. آزمایش‌های مقدماتی برای اصلاح زبری بستر رودخانه برای تأمین تراز مورد نظر در دبی سیل دوساله انجام شده‌است. آزمایش‌های سری اول بدون نصب صفحات و آزمایش‌های سری دوم با نصب صفحات در شش زاویه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ٦۰ درجه نسبت به ساحل خارجی بوده‌است. آزمایش‌ها در دبی ۲۱,٤ لیتر بر ثانیه و با عمق ثابت ۱۵,۵ سانتی‌متر (عمق در مسیر مستقیم) معادل عدد فرود ۰,۲ انجام گرفت. ازآنجاکه بیش از ۷۰ درصد فرسایش قوس‌ها در دبی با دورهٔ بازگشت دو ساله اتفاق می‌افتد [18]، لذا شرایط جریان در این دبی مدل گردید. دبی جریان توسط دبی‌سنج الکتریکی که قبل از شیر کنترل هیدرولیکی قرار داشت تنظیم می‌گردید. برای تنظیم عمق آب از دریچه‌ای که در انتهای مدل فیزیکی تعبیه شده بود استفاده گردید. در ابتدای هر آزمایش رسوبات بستر (مواد پلی‌اتلین) کاملا تراز می‌شد و شیر کنترل به‌آرامی و با دبی کم و درحالتی‌که دریچهٔ انتهایی کاملا بسته بود، باز می‌شد. این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کرد که عمق آب در مدل کاملا بالا می‌آمد (برای جلوگیری از ایجاد خطای قبل از آزمایش) و درنهایت به‌آرامی با باز کردن شیر کنترل، هم‌زمان دریچه هم باز می‌شد. بنابراین دبی مورد نظر با عمق ثابت ۱۵,۵ سانتی‌متر در مدل برقرار می‌شد. هر آزمایش به مدت ٤ ساعت انجام گرفت. زمان چهار ساعت با انجام یک آزمایش طولانی ۱۲ ساعته به‌دست آمد که تغییرات عمق چالهٔ فرسایشی پس از آن با گذشت ٤ ساعت کمتر از یک میلی‌متر بود. در انتها دریچهٔ انتهایی بسته و جریان قطع می‌شد. بعد از زهکشی شدن کامل مدل توسط لولهٔ زهکش که در زیر مدل تعبیه شده بود، برداشت پروفیل بستر بااستفاده از متر لیزی روی اسکلت تراز و مدرج‌شده برداشت می‌گردید. لازم به ذکر است که شبکهٔ برداشت پروفیل بستر به‌علت تغییرات پروفیل بستر کاملا متغیر بود. شکل (۳) نمایی از مدل و تعلقات آن را نشان می‌دهد.

صفحات شناور از جنس گالوانیزه به ضخامت دو میلی‌متر به ارتفاع ۳ سانتی‌متر و طول ٦ سانتی‌متر توسط میله‌ای فلزی که به صفحات جوش شده بود روی یک اسکلت فلزی که هم قابلیت تغییر زاویه، فاصله از ساحل و عمق مورد نظر برای صفحات شناور را میسر می‌کرد، سوار شدند (شکل ٤). ازآنجاکه درخصوص کاربرد صفحات شناور مطالعه‌ای تاکنون انجام نشده‌است و با درنظر گرفتن این که صفحات شناور نیز با ایجاد تغییرات مشابهی در الگوی جریان می‌توانند باعث تغییر در الگوی رسوب‌گذاری شوند، در این ابعاد صفحات، فواصل بین صفحات و فاصله از ساحل، براساس توصیهٔ اودگارد [17]، برای صفحات مستغرق محاسبه گردید.



شکل ۳ نمایی از مدل فیزیکی قوس جنگیه همراه با متعلقات آن



شکل ٤ نمایی از کارگذاری صفحات شناور در قوس قبل از انجام آزمایش

این صفحات در محدودهٔ فرسایشی قوس خارجی که بااستفاده از آزمایش‌های سری اول تعیین گردید، کارگذاری شدند. تعداد هفت صفحهٔ شناور در محدودهٔ تقریبی ۱۳۰ درجه‌ای قوس با طول ثابت ٦ سانتی‌متر (طول صفحات شناور در سری آزماش‌های تعیین زاویه براساس تحقیق جونالی و یوپتال کومار [19] درمورد صفحات مستغرق ثابت درنظر گرفته شد) و با فاصلهٔ طولی برابر با شانزده برابر ارتفاع صفحات (١٦H) (توصیه‌شده توسط اودگارد [18] برای صفحات مستغرق)، عمق کارگذاری برابر با ارتفاع صفحات از سطح آب (H) و فاصله از ساحل خارجی برابر با ٤ برابر ارتفاع صفحات شناور (٤H) و شش زاویهٔ ذکرشده نسبت به ساحل خارجی کارگذاری شدند (فاصله از ساحل و عمق کارگذاری براساس آزمایش‌های مقدماتی سری دوم تعیین شده‌اند). شکل (۵) نمایی نزدیک از نحوهٔ نصب صفحات را نشان می‌دهد.



شکل ۵ نمایی نزدیک از نصب صفحات

آنالیز ابعادی

متغییرهای مؤثر بر فرسایش و رسوب‌گذاری در تحقیق حاضر عبارتند از:

- متغیرهای مربوط به هندسهٔ سیستم:
  - شیب طولی مدل Sb
  - عرض مدل B
  - شعاع قوس R
  - زاویهٔ مرکزی قوس δ
- متغیرهای مربوط به سازه‌ها:
  - ارتفاع صفحات H
  - طول صفحات شناور L
  - زاویهٔ قرارگیری صفحات شناور نسبت به ساحل خارجی θ
  - ضخامت صفحات شناور α
  - فاصله از ساحل خارجی صفحات شناور d
  - عمق کارگذاری صفحات شناور de (فاصلهٔ لبهٔ بالایی صفحات از سطح آب)
  - فاصلهٔ طولی صفحات شناور δL
- متغیرهای مربوط به جریان:
  - سرعت متوسط جریان در بازهٔ مستقیم قوس U
  - عمق جریان در بازهٔ مستقیم قوس h
  - شتاب ثقل g
- متغیرهای مربوط به سیال:
  - جرم واحد حجم مایع ρ
  - ضریب لزجت دینامیکی μ

- متغیرهای مربوط به رسوبات:
  - قطر متوسط ذرات رسوبی d50
  - چگالی رسوبات Gs
  - انحراف معیار رسوبات σ

باتوجه به متغییرهای معرفی‌شده می‌توان نوشت:

معادلهٔ ۱:

$$\varphi = f(S_b, B, R, \delta, h, L, \theta, \alpha, d, d_e, \delta_L, U, H, g, \rho, \mu, d_{50}, G_s, \sigma)$$

بااستفاده از تئوری π باکینگهام و درنظر گرفتن متغیرهای h، U، ρ به‌عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بی‌بعد زیر به‌دست می‌آیند:

معادلهٔ ۲ :

$$\varphi = f\left(S_b, \delta, \theta, \sigma, \frac{B}{h}, \frac{R}{h}, \frac{L}{h}, \frac{\alpha}{h}, \frac{d}{h}, \frac{H}{h}, \frac{d_e}{h}, \frac{\delta_L}{h}, \frac{U}{\sqrt{gh}}, \frac{\rho U h}{\mu}, \frac{d_{50}}{h}\right)$$

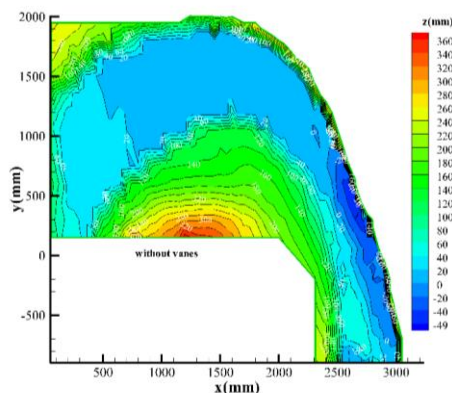
در این تحقیق فاصلهٔ طولی صفحات ثابت و برابر 8L، فاصله از ساحل خارجی ثابت و برابر با 4H، عمق کارگذاری صفحات ثابت و برابر با H، عمق جریان برابر با ۱۵/۵ سانتی‌متر و... و تنها دو متغییر زاویهٔ قرارگیری نسبت به ساحل و عدد فرود متغییر بوده است؛ درنتیجه تابع زیر به‌دست خواهد آمد:

معادلهٔ ۳ :

$$\varphi = f(\theta, F_r)$$

نتایج

نتایج آزمایش‌های شاهد (بدون نصب صفحات) در دبی سیل دوساله (عدد فرود ۰/۲) همان‌گونه که در شکل (٦) مشخص است، نشان می‌دهد که حفرهٔ آبشستگی چسبیده به ساحل خارجی از موقعیت ۱۳۰ درجه قوس شروع می‌شود و تا موقعیت ۰,۵ متر بعد از انتهای قوس ادامه دارد. سپس حفره از ساحل به میانهٔ رودخانه منتقل می‌شود. مقدار حداکثر عمق آبشستگی در موقعیت ۱۵۰ تا ۱۷۰ درجهٔ قوس قرار دارد. این اندازه‌گیری‌ها با مطالعات منصوری و همکاران [20] که در آن موقعیت حداکثر چالهٔ آبشستگی را در قوس‌های ۱۸۰ درجه و با عرض یکسان مطالعه کرده‌اند مطابقت دارد؛ با این تفاوت که موقعیت حداکثر عمق چاله در این مطالعه به موقعیت ۱۵۰ تا ۱۸۰ درجه تغییر کرده است که این به‌دلیل همگرا بودن قوس مطالعهٔ حاضر می‌باشد. همچنین شکل (٦) نشان می‌دهد که بستر در قوس قبل از موقعیت ۱۳۰ درجه هیچ‌گونه فرسایشی نداشته است. دلیل عمدهٔ آن را می‌توان شرایط هندسی قوس ذکر کرد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، رأس قوس جنگیه به‌دلیل فرسایش‌ها و رسوب‌گذاری‌هایی که قبلا قوس داشته‌است، به زاویهٔ حدود ۱۱۰ درجه منتقل شده‌است. همچنین رسوب‌گذاری‌های قوس داخلی نیز باعث شده است تا قوس ازنظر عرضی همگرا شود، به‌طوری‌که عرض رودخانه از ۱ متر به ۰/۳ متر در موقعیت ۱۳۰ درجه کاهش یافته است. از این موقعیت به بعد به‌دلیل شرایط ژئوتکنیکی مصالح رسوبی بستر و به‌خصوص ساحل (که بیشتر از جنس رس کاملا تحکیم‌یافته است) و نیز به‌دلیل عدم رخداد سیل دوساله در ده سال گذشته (به‌خاطر خشکسالی حاکم بر منطقه و تنظیم دبی‌های سیلابی توسط سدهای مخزنی بالادست) تخریب ساحل دیده نمی‌شود و عرض رودخانه در اثر رسوب‌گذاری‌های قوس داخلی کاهش یافته است و به‌طور متوسط به ۰/۳ متر می‌رسد.

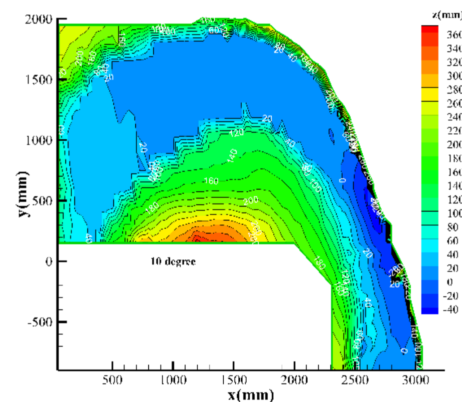


شکل ٦ توپوگرافی بستر در حالت بدون صفحات، (الف) در عدد فرود ۰,۲ (دبی دوساله)

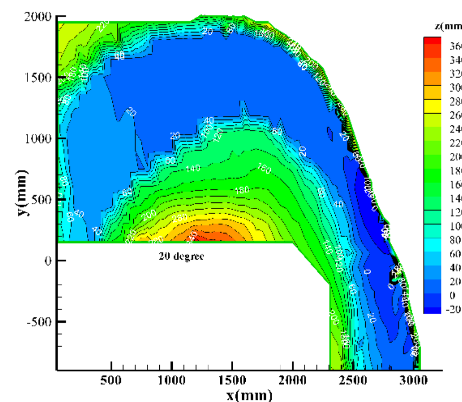
وضعیت توپوگرافی بستر در شرایط نصب صفحات در زاویهٔ ۱۰ درجه (شکل ۷–الف) و زاویهٔ ۲۰ درجه (شکل ۷–ب) برای دبی سیل دوساله (عدد فرود ۰/۲) نشان داده شده است. در زاویهٔ نصب ۱۰ درجه، حفرهٔ فرسایشی از موقعیت ۱۳۰ درجه شروع شده است و تا موقعیت ۰٫۵ متر بعد از انتهای قوس ادامه دارد. موقعیت حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی در زاویهٔ ۱٦۰ تا ۱۸۰ درجهٔ قوس قرار دارد. میزان حداکثر عمق چالهٔ آبشستگی نیز برابر ٤ سانتی‌متر می‌باشد که کاملا به ساحل خارجی چسبیده است. تزریق ذرات ریز بسیار سبک در سطح آب در دو حالت بدون و با صفحات شناور نشان داد که در شرایط بدون صفحات، ذرات فوق پس از ورود به قوس به‌تدریج به ساحل خارجی نزدیک می‌شوند و از موقعیت حدود ۱٤۰ درجه این ذرات چسبیده به ساحل حرکت می‌کنند. دلیل اصلی چنین مشاهده‌ای وجود جریان‌های ثانویه‌ای است که در قوس‌ها مشاهده شده است. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که در یک قوس ۱۸۰ درجه جریان ثانویه از حدود ابتدای قوس شروع می‌شود و البته قدرت آن در طول قوس تغییر می‌کند. در اثر جریان ثانویه لایه‌های بالایی سطح آب به‌سمت قوس خارجی و لایه‌های پایینی به‌سمت قوس داخلی در حرکت هستند. ازاین‌رو است که ذرات شناور ریزدانه به‌سمت قوس خارجی کشیده می‌شوند. تداخل این جریان با جریان اصلی مسیر حرکت ثانویه را به‌شکل حلزونی و رو به پایین‌دست در می‌آورد. جهت حرکت در ساحل خارجی به‌سمت پایین و در ساحل داخلی به‌سمت بالا است [21]. وجود چالهٔ فرسایشی در محل پنجهٔ ساحل نیز به همین دلیل می‌باشد. تزریق مواد شناور ریزدانه در آزمایش با صفحات شناور نشان داد که عمدهٔ این ذرات قبل از رسیدن به ساحل خارجی منحرف می‌شوند و درراستای جریان به‌سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند. صفحات شناور، جریان در مقطع را به دو ناحیه تقسیم می‌کنند که شامل ناحیهٔ اول (بین ساحل خارجی و صفحات) و ناحیهٔ دوم (از صفحات تا ساحل داخلی) است. سرعت ذرات شناور در ناحیهٔ اول کمتر از سرعت همین ذرات در ناحیهٔ دوم است؛ به‌عبارتی صفحات شناور باعث شده‌اند تا لایه‌ای برشی در مقطع عرضی و در طول قوس شکل بگیرد و دلیل اصلی نزدیک نشدن عمده ذرات رسوبی به ساحل در آزمایش‌های با صفحات نیز همین می‌تواند باشد. البته لازم است به‌طور جداگانه مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت برداشت گردد تا به‌طور دقیق درخصوص موقعیت لایهٔ برشی و میزان کاهش سرعت در ناحیهٔ یک بحث گردد که هدف مطالعهٔ حاضر نبوده است. درواقع باتوجه به این‌که خط‌القعر از ساحل خارجی با کارگذاری صفحات شناور دور شده‌است بنابراین پنجه در برابر فرسایش ناشی از جریان حلزونی در قوس ایمن شده است و بنابراین ریزش دیوارهٔ ساحلی در قوس خارجی می‌تواند کنترل شود و از جابه‌جایی قوس جلوگیری کند. همان‌طور که قبلا اشاره شد تغییرات زاویهٔ نصب صفحات شناور، از این جهت که باعث تغییر در زاویهٔ برخورد خطوط جریان به این سازه‌ها می‌شود، می‌تواند بر الگوی فرسایش و رسوب تغییر ایجاد کند. در زاویهٔ نصب ۲۰ درجه (شکل ۷–ب) حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی در قوس خارجی معادل ۲ سانتی‌متر می‌باشد؛ که این مقدار نسبت به زاویهٔ نصب ۱۰ درجه کاهش ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد. احتمال می‌رود با افزایش زاویهٔ نصب از ۱۰ درجه به ۲۰ درجه، باتوجه به این‌که سطح تصویرشده عمود بر جریان افزایش می‌یابد، نیروی دراگ بیشتری بر صفحات وارد شود که منجر به افزایش اختلاف فشار در طرفین صفحات شناور می‌شود. افزایش اختلاف فشار باعث افزایش قدرت گردابه‌های دنباله‌دار در بین صفحات شناور خواهد شد (مشابه صفحات مستغرق). درنهایت هر اندازه قدرت گردابه‌های دنباله‌دار ناشی از صفحات شناور بیشتر گردد، اثر بیشتری بر

کاهش قدرت جریان ثانویه در قوس دارد و نهایتا عمق چالهٔ فرسایشی کاهش پیدا می‌کند. البته اظهار نظر دقیق این مباحث نیازمند برداشت الگوی جریان در حالت‌های مختلف می‌باشد که هدف تحقیق حاضر نیست. افزایش زاویهٔ نصب صفحات شناور از ۱۰ درجه به ۲۰ درجه، علاوه‌بر این‌که باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی از ٤ سانتی‌متر به ۲ سانتی‌متر شده است باعث دور شدن چالهٔ فرسایشی از ساحل خارجی بعد از موقعیت ۱۷۰ درجه تا انتهای میدان داده‌برداری نیز شده است.

شکل ۸ تغییرات توپوگرافی بستر در دو زاویهٔ نصب ۳۰ درجه (شکل ۸-الف) و ٤۰ درجه (شکل ۸-ب) را در عدد فرود ۰,۲ (معادل دبی دوسالهٔ رودخانه کارون) نشان می‌دهد.

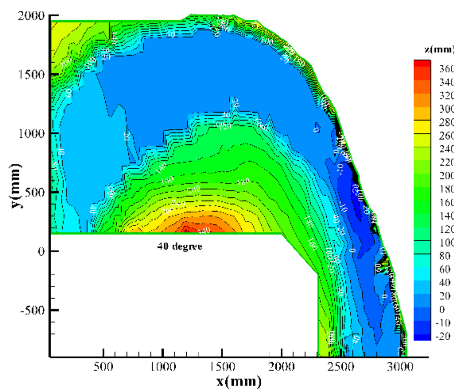


(الف)

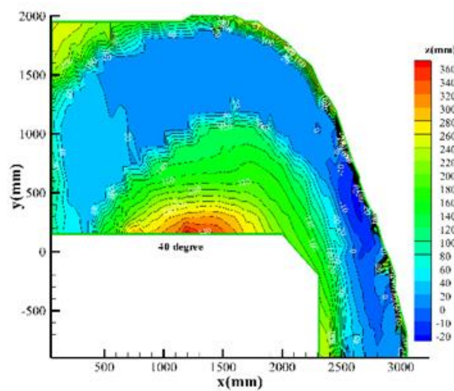


(ب)

شکل ۷ توپوگرافی بستر در حالت نصب صفحات، الف) در زاویهٔ ۱۰ درجه، ب) در زاویهٔ نصب ۲۰ درجه در عدد فرود ۰/۲



(الف)



(ب)

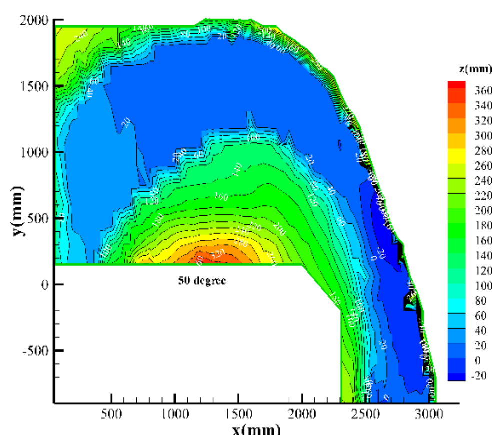
شکل ۸ توپوگرافی بستر در حالت نصب صفحات، الف) در زاویهٔ ۳۰ درجه، ب) در زاویهٔ نصب ٤۰ درجه

در زاویهٔ نصب ۳۰ درجه حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی از موقعیت تقریبی ١٦٥ تا ۱۷۰ درجهٔ قوس است و مقدار آن برابر با ٤ سانتی‌متر می‌باشد. در این حالت نسبت به حالت بدون صفحات (مقایسهٔ شکل ٦ با شکل ۸-الف)، حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی ۹ میلی‌متر کاهش یافته است؛ با این تفاوت که در زاویهٔ نصب ۳۰ درجه موقعیت حداکثر چالهٔ فرسایشی به‌اندازهٔ ۵ سانتی‌متر از ساحل خارجی دور شده و از موقعیت ۱۷۰ درجه تا انتهای میدان داده‌برداری چالهٔ فرسایشی به‌اندازهٔ ۱۰ سانتی‌متر دور شده و ساحل خارجی در این بازه کاملا درمقابل فرسایش تثبیت شده است. در زاویهٔ نصب ٤۰ درجه حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی در موقعیت ١٦۰ تا

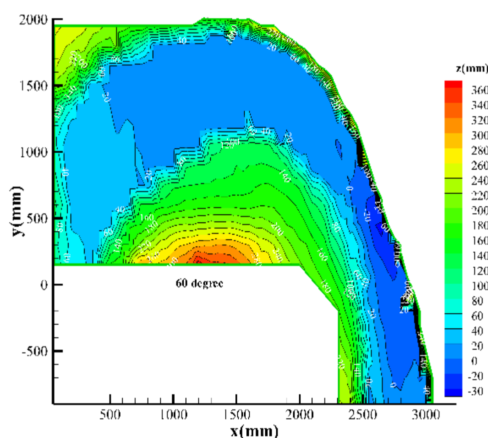
۱۸۰ درجه اتفاق افتاده است و معادل ۲ سانتی‌متر می‌باشد که از ساحل خارجی ۱۰ سانتی‌متر دور شده است. در این حالت ساحل خارجی در طول چالهٔ فرسایشی کاملا درمقابل فرسایش محفوظ شده و حتی ساحل‌سازی در ساحل خارجی اتفاق افتاده‌است؛ بنابراین در زاویهٔ ۴۰ درجه اثر صفحات بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری بهتر بوده است به‌گونه‌ای که حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی نسبت به حالت بدون صفحات ٦۰ درصد کاهش داشته و به‌اندازهٔ ۱۰ سانتی‌متر از ساحل خارجی دور شده‌است که این نتیجه با نتایج مارلیوس و سینها [22] و گوپتا و همکاران [23] در مورد صفحات مستغرق کاملا مطابقت دارد. که این محققان نشان دادند که بیشترین کارایی هیدرولیکی صفحات مستغرق در زاویهٔ نصب ۴۰ درجه اتفاق می‌افتد.

شکل (۹) تغییرات توپوگرافی بستر در زاویهٔ نصب ۵۰ درجه (شکل ۹–الف) و ٦۰ درجه (شکل ۹–ب) را در عدد فرود ۰٫۲ نشان می‌دهد. در هر دو حالت حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی از موقعیت ۱٦۰ تا ۱۷۰ درجه و برابر با ۳ سانتی‌متر می‌باشد که کاملا به ساحل خارجی چسبیده است. می‌توان گفت که با افزایش زاویهٔ نصب (زوایای بزرگ‌تر از ۴۰ درجه) زاویهٔ برخورد جریان با صفحات از حالت عمودی خارج می‌شود و درنهایت باعث کاهش اختلاف فشار طرفین صفحات می‌شود. با کاهش اختلاف فشار، قدرت گردابه‌های دنباله‌دار کاهش پیدا می‌کند که درنهایت باعث کاهش اثر صفحات شناور بر توپوگرافی بستر می‌شود؛ بنابراین زوایای نصب بزرگ‌تر از ۴۰ درجه برای نصب صفحات شناور توصیه نمی‌شود که با نتایج اودگارد [24] درمورد صفحات مستغرق همخوانی کامل دارد.

باتوجه به اینکه فرسایش دیوار ساحل خارجی به‌علت فرسایش پنجه اتفاق می‌افتد، بنابراین در ادامهٔ فرسایش پنجهٔ ساحلی در قوس خارجی و در بازهٔ چالهٔ فرسایشی در زوایای نصب مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۱۰). شکل (۱۰– الف) تغییرات تراز بستر در پنجهٔ ساحل خارجی در محدودهٔ چالهٔ فرسایشی در زاویهٔ ۱۰ و ۲۰ درجه را نشان می‌دهد. در تمام نمودارها مبدا مختصات معادل ۱۳۰ درجه قوس می‌باشد. در زاویهٔ نصب ۱۰ درجه طول چالهٔ فرسایشی برابر با ۱٫٦ متر بوده و بیشترین مقدار فرسایش در پنجهٔ ساحل خارجی برابر با ۳۵ میلی‌متر و در فاصلهٔ ۴۰ سانتی‌متری از ابتدای چالهٔ فرسایشی اتفاق افتاده است.

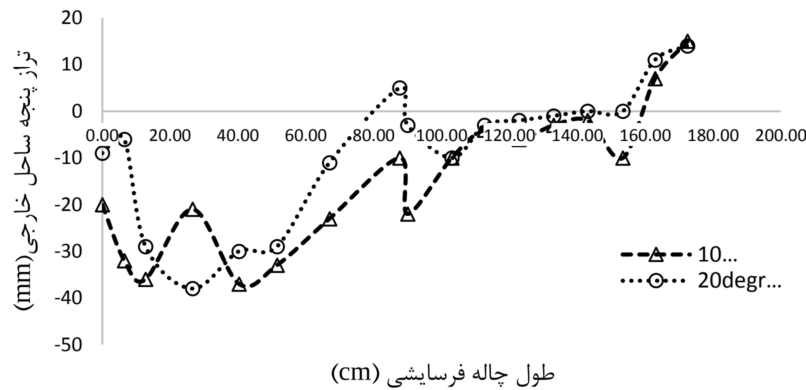


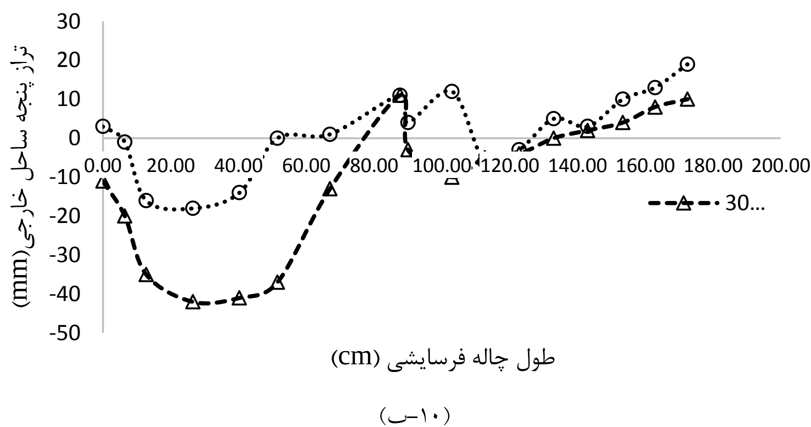
(الف)



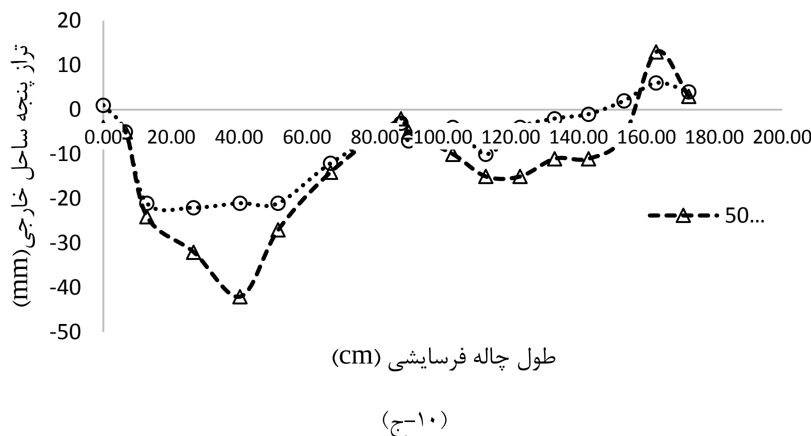
(ب)

شکل ۹ توپوگرافی بستر در حالت نصب صفحات، الف) در زاویهٔ ۵۰ درجه، ب) در زاویهٔ نصب ٦۰ درجه





(١٠–ب)



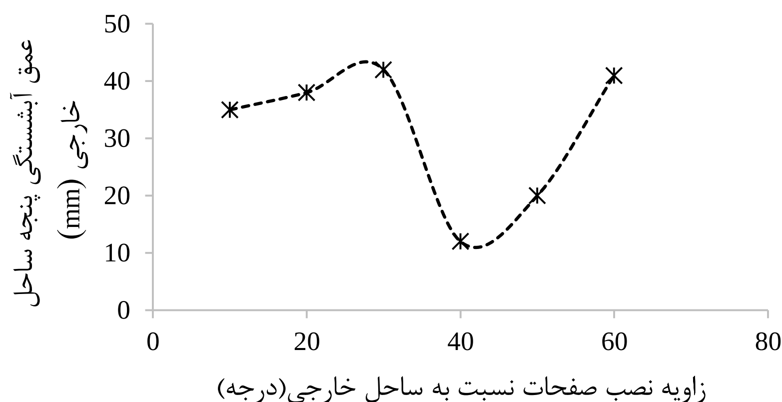
(١٠–ج)

شکل١٠ تغییرات تراز بستر در پنجهٔ ساحل خارجی در زوایای ١٠ و ٢٠ درجه (١٠–الف)، ٣٠ و ٤٠ درجه (١٠–ب) و ٥٠ و ٦٠ درجه (١٠–ج)

در زاویهٔ ٢٠ درجه طول چالهٔ فرسایشی در پنجهٔ ساحل خارجی به ١,٢ متر کاهش یافته و حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی برابر با ٤٠ میلی‌متر بوده است و در موقعیت ٣٠ سانتی‌متر از ابتدای چالهٔ فرسایشی قرار دارد. در زاویهٔ نصب ٣٠ درجه طول چالهٔ فرسایشی در پنجهٔ ساحل خارجی به ١ متر کاهش یافته است و حداکثر عمق

چالهٔ فرسایشی در پنجهٔ ساحلی در محدودهٔ ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر از ابتدای چالهٔ فرسایشی و به‌مقدار ۴۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱۰–ب). با نصب صفحات شناور در زاویهٔ نصب ۴۰ درجه، طول چالهٔ فرسایشی در پنجهٔ ساحل خارجی به ٤٤ سانتی‌متر کاهش پیدا می‌کند و حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی برابر با ۱۲ میلی‌متر می‌باشد و در موقعیت ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری از ابتدای چالهٔ فرسایشی (مبدا مختصات) اتفاق افتاده است. (شکل ۱۰–ب). در زوایای بزرگ‌تر از ۴۰ درجه طول و عمق چالهٔ فرسایشی مجددا افزایش می‌یابند (شکل ۱۰–ج). لازم به ذکر است که در موقعیت ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری از ابتدای چالهٔ فرسایشی به‌علت افزایش عرض مجرا، آبشستگی پنجهٔ ساحلی کاهش یافته است و درادامه و بعد از افزایش عرض مجرا مجددا عمق چالهٔ فرسایشی در پنجهٔ ساحل افزایش پیدا کرده است.

فرسایش ساحل خارجی به علت فرسایش پنجه در ساحل اتفاق می‌افتد، بدین ترتیب که فرسایش در پنجه باعث ریزش دیوار ساحلی می‌شود و جابه‌جایی در مئاندر رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد. اثر زاویه (برحسب درجه) نصب صفحات شناور نسبت به ساحل خارجی بر عمق فرسایش در پنجهٔ ساحل خارجی در شکل (۱۱) ساحل خارجی آورده شده‌است. باتوجه به نمودار در زاویهٔ نصب ٤٠ درجه نسبت به ساحل خارجی کمترین آبشستگی در پنجهٔ ساحل خارجی اتفاق افتاده است و برابر با ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. و بیشترین آبشستگی در دو زاویهٔ ۳۰ درجه و ٦٠ درجه است و برابر با ٤٢ میلی‌متر می‌باشد. احتمال می‌رود در زاویهٔ نصب ۴۰ درجه به‌علت این‌که خطوط جریان به‌صورت عمود به صفحات شناور برخورد می‌کنند و بیشترین اختلاف فشار در طرفین صفحات ایجاد می‌شود، درنتیجهٔ افزایش گرادیان فشار طرفین صفحه، جریان مولد ایجادشده توسط صفحات قوی‌تر می‌شود و اثر بیشتری بر جریان اصلی که همواره در نزدیک سطح آب به‌سمت قوس خارجی است می‌گذارد (جریان مولد ایجادشده از سمت قوس خارجی (منطقهٔ پرفشار) به‌سمت پشت صفحات (منطقهٔ کم‌فشار) می‌باشد). البته اظهار نظر دقیق الگوی جریان نیازمند برداشت الگوی جریان اطراف صفحات می‌باشد که خارج از بحث این تحقیق می‌باشد.



شکل ۱۱ تغییرات عمق آبشستگی در پنجهٔ ساحل خارجی در زوایای نصب مختلف

خلاصه و جمع‌بندی

۱- در آزمایش شاهد و بدون نصب صفحات شناور چالهٔ فرسایشی با عمق حداکثر ۵۰ میلی‌متر از موقعیت ۱۳۰ درجه قوس در نزدیک ساحل خارجی شروع می‌شود و تا انتهای میدان داده‌برداری ادامه دارد.

۲- سازهٔ صفحات شناور باعث تغییر اساسی در الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس رودخانه‌ها می‌شود.

۳- حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی در دو زاویهٔ نصب ۲۰ و ۴۰ درجه برابر با ۲۰ میلی‌متر می‌باشد که درمقایسه با آزمایش شاهد (حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی برابر با ۴۹ میلی‌متر می‌باشد) ۶۰ درصد کاهش یافته است.

۴- در زاویهٔ نصب ۲۰ درجه چالهٔ فرسایشی کاملا به ساحل خارجی می‌چسبد ولی در زاویهٔ نصب ۴۰ درجه چالهٔ فرسایشی از ساحل خارجی دور می‌شود.

۵- بهترین زاویهٔ نصب صفحات شناور برابر با ٤۰ درجه می‌باشد که با نتایج اودگارد [24] درمورد صفحات مستغرق کاملا مطابقت دارد؛ بدین ترتیب که در زاویهٔ ٤۰ درجه، قوی‌ترین گردابه‌ها در اثر برخورد جریان با صفحات مستغرق ایجاد می‌گردد.

٦- در زاویهٔ نصب ٤۰ درجه، طول چالهٔ فرسایشی برابر با ٤٤ سانتی‌متر می‌باشد که نسبت به آزمایش شاهد (١٦۰سانتی‌متر) ۷۳ درصد کاهش یافته است، بنابراین با نصب صفحات شناور در این زاویه، کمترین طول از ساحل خارجی در معرض فرسایش خواهد بود.

مراجع

۱. جعفرزداه، م.ر، «مکانیک رودخانه»، ترجمهٔ کتاب پی یر ژولین، نشر دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۸).

۲. یاسی، م، «راهنمای استاندارد طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای»، نشریهٔ استاندارد صنعت آب و برق ایران، ش. ٥١٦، (۱۳۸۸).

۳. عباسی، ع.ا، ملک‌نژاد، م، «مطالعهٔ آزمایشگاهی تأثیر مشخصات هندسی آبشکن‌های نفوذپذیر مستقیم و Tشکل بر آبشستگی اطراف آنها»، فصلنامهٔ علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال دوم، ش. ۸ صص. ۱۰۷-۹۵، (۱۳۹۱).

4. Abad, J. D., Rhoads, B. L., Guneralp, I. and Gorcia, M.H., "Flow Structure at Difference Stages in a Meander-bend with Bendway Weirs", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 8, pp. 1052-1063, (2008).

5. Jarrahzade, F., and Shafai Bejestan, M., "Comparison of Maximum Scour Depth in Bank Line and Nose of Submerged Weirs in a Sharp Bend", *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, pp. 1071-1076, (2011).

٦. رامش، س، جراح‌زاده، ف، مشکورنیا و شفاعی بجستان، م، «وضعیت پروفیل طولی فرسایش و رسوب تحت تأثیر Bendway در خم ۹۰درجهٔ تند»، نهمین کنفرانس سرریز هیدرولیک ایران، تهران، (۱۳۸۹).

۷. همتی، م، قمشی، م، کاشفی‌پور، س.م، قمشی، م، «بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول سریزهای مستغرق بر الگوی رسوب و تراز آب در پیچان‌رود»، نشریهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، ج. ٤۳، ش. ۱، صص. ۷٦-٦٦، (۱۳۹۲).

8. Odgaard, A.jacob, "River Channel Stabilization with Submerged Vanes", In Yang, Chih Ted, Wang, Lawrence K. (Eds.) "Advanced in Water Resources Engineering", *springer international publishing*, pp. 107-136, (2015).

۹. آتشی، و، شفاعی بجستان، م، احدیان، ج، «ارزیابی الگوی جریان و تنش برشی در قوس ۹۰درجهٔ تند با حضور سریز Wشکل»، مجلهٔ مهندسی منابع آب، سال پنجم، تابستان ۹۱، صص. ۲۸-۱۵، (۱۳۹۱).

10. Pagliara, S., Kurdistani, S. M., and Cammarata, L., "Scour of Clear Water Rock W-Weirs in Straight Rivers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 140, No. 4, 06014002(7), (2014).

11. Bhuiyan, F., Hey, R. D., and Wormleaton, P. R., "River Restoration using W-weir", *Journal of Hydraulic Engineering*, vole 133(6), pp. 596–609. (2007).

12. Rosgen, D. L., "The Cross-vane, W-weir and J-hook Vane Structures Description, Design and Application for Stream Stabilization and River Restoration", *Wild land Hydrology, Inc.* 11210 N. County Road 19 Ft. Collins, Colorado 80524970-568-0002, (2006).

13. Pagliara, S., Kurdistani, S. M., and Santucci, I., "Scour Downstream of J-hook Vane Structures in Straight Horizontal Channels", *Acta Geophysical,* vole 61(5), pp. 1211–1228, (2013).

14. Bhuiyan, F., Hey, R. D., and Wormleaton, P. R., "Bank-Attached Vanes for Bank Erosion Control and Restoration of River Meanders", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 136(9), pp. 583-596, (2010).

15. Bahrami Yarahamdi M, Shafai Bejestan M., "Sediment Management and Flow Patterns at River Bend due to Triangular Vanes Attached to the Bank", *Journal of Hydro-environmental Research,* Vol. 10(0), pp. 64-75, (2016).

١٦.بهرامی یار احمدی، م، شفاعی بجستان، م، «بررسی تغییرات طول مؤثر صفحات مثلثی‌شکل بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در قوس ملایم ۹۰درجه»، نشریهٔ مهندسی عمران مشهد، سال بیست و هفتم، ش. ۱، صص. ۱۰۰–۸۷ (۱۳۹٤).

١٧. بهرامی یار احمدی، م، شفاعی بجستان، م، «تأثیر سری صفحات مثلثی در قوس ملایم ۹۰درجه بر الگوی توپوگرافی بستر»، نشریهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، ج. ٤٥، ش. ۳، بدون نام، (۱۳۹٤).

18. Odgard A.jacob, "River Training and Sediment Management with Submerged Vanes", *Published by American Society of Civil Engineers,* (2010).

19. Junali, T., Utpal Kumar, M., , "Experimental Investigation of Local Scour Around Submerged Vanes", International *journal Innovative research in advanced engineering,* Vol. 2(7), pp. 21-24, (2015).

۲۰. منصوری، ا.م، ع، نیشابوری، ع.ا، هنربخش، ا، «مطالعهٔ عددی سه‌بعدی تغییرات تراز بستر در قوس ۱۸۰درجه»، مجلهٔ علمی- پژوهشی عمران مدرس، دورهٔ دهم، ش. ۱، بهار ۸۹ (۱۳۸۹).

21. Liaght, A., Mohamadi, K., Rahmanshahi, M., "3D Investigation of Flow Hydraulic in U Shape Meander Bends with Constant, Decreasing and Increasing Width", *Journal of river engineering,* Vol. 2, No. 3, (2014).

22. Marelius, F. and Sinha, S. K. "Experimental Investigation of Flow Past Submerged Vanes", *J. Hydraul. Eng,* Vol. 124(5), pp. 542-545, (1998).

23. Gupta, P. U., Sharma, N. and Ojha, C. S. P., "Performance Evaluation of Submergence Ratio of a Rectangular Submerged Vane with a Collar", *International J. of Sediment Res.,* Vol. 21(1), pp.42-49, (2006).

24. Odgard A.jacob, "Sediment Management in Rivers Using Submerged Vanes", *proceedings of the congress-international association for hydraulic research,* Vol. 4, pp. 60-65, (1995).